



Marco Toigo

Muskel Revolution

Konzepte und Rezepte
zum Muskel-
und Kraftaufbau

SACHBUCH



Springer Spektrum

MuskelRevolution

Marco Toigo

MuskelRevolution

Konzepte und Rezepte zum Muskel-
und Kraftaufbau



Springer Spektrum

Marco Toigo
Exercise Physiology
ETH Zurich
Zürich
Schweiz

ISBN 978-3-642-37640-5

ISBN 978-3-642-37641-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-37641-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Marion Krämer, Martina Mechler

Redaktion: Birgit Jarosch

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Einbandabbildung: © tribalium81, fotolia.com.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-spektrum.de

Vorwort

In praktisch jeder Zeitschrift finden Sie Tipps und Empfehlungen von „Experten“ zur effektiven und effizienten Trainingsgestaltung und zur optimalen Ernährung. Im Buchhandel füllen die Bücher über Kraft- und Fitnesstraining ganze Regale und Abteilungen. Auch im Fernsehen wimmelt es von entsprechenden Botschaften und das Internet stellt diesbezüglich einen wahren Informationsdschungel dar. Wie nur soll sich ein normaler Mensch, der sich über Training und Ernährung informieren möchte, in diesem Meinungs-sumpf zurechtfinden? Denn so viel ist klar: Es gibt nicht annähernd so viele wissenschaftlich gesicherte Fakten zum Thema Training und Ernährung, wie es Trainingsempfehlungen und sogenannte Trainingssysteme gibt.

Um einen Weg durch den Dschungel an Trainings- und Ernährungsmeinungen zu finden und den Blick fürs Wesentliche zu schärfen, gibt es nur eines: Eignen Sie sich die nötige Fachkompetenz an. Dazu benötigen Sie lediglich verständliche, qualitätskontrollierte Informationen. *Die* Quelle für qualitätskontrollierte Fachinformationen ist die gesamte *peer reviewed*-publizierte Literatur (Literatur, die vor ihrer Veröffentlichung von unabhängigen Experten begutachtet wurde) aus den verschiedensten Disziplinen der naturwissenschaftlichen Muskelforschung wie der Muskelphysiologie, der Molekular- und Zellbiologie, der Genetik, der Neurowissenschaft, der Ernährungswissenschaft und der Biomechanik. Erst durch die Integration der unterschiedlichen wissenschaftlichen Perspektiven und Erkenntnisse sowie den Abgleich mit der Trainingspraxis ergibt sich ein Gesamtbild, aus dem man Schlussfolgerungen ziehen kann, was hinsichtlich Training und Ernährung sinnvoll bzw. verhältnismäßig ist.

In diesem Buch versuche ich, eine logische und robuste Brücke zwischen diesen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und der Trainings- und Ernährungspraxis zu bauen. Ich weiß, an dieser Stelle käme normalerweise der Punkt, an dem der Autor Ihnen auf subtile Art und Weise seinen Experten-

status signalisiert, damit Sie auch glauben, was im Buch steht. Dies geschieht üblicherweise über die Kommunikation von Statussymbolen, das heißt über eine Aufzählung der wissenschaftlichen Auszeichnungen, von sportlichen Erfolgen, der jahrelangen Erfahrung oder schlicht über das muskulöse Aussehen. Sie werden dieses Bling-Bling hier nicht vorfinden. Ich ziehe es vor, harte Fakten sprechen zu lassen.

Gebruuchsanweisung für dieses Buch

Das Buch besteht aus den vier folgenden Elementen: Haupttext, Infoboxen („Wissenstropfen“), Abbildungen und Literaturverzeichnis. In den Boxen, die über das ganze Buch verteilt sind, sollen weitverbreitete Fragen kurz und klar beantwortet werden. Im Literaturverzeichnis finden Sie die genauen Angaben zu allen im Text zitierten wissenschaftlichen Arbeiten, Büchern oder Internetseiten. Die Abbildungen und Diagramme sollen helfen, Textinhalte zu veranschaulichen und dadurch verständlicher zu machen, bzw. einen anderen Zugang zu ermöglichen. Der Haupttext ist in 23 Kapitel gegliedert, die allesamt einen sehr tiefen, aber trotzdem praxisbezogenen Einblick in die Natur(wissenschaft) von Skelettmuskeln und deren Formbarkeit durch Krafttraining liefern.

In diesem Buch stehen Ihnen mehrere Zugangsarten und inhaltliche Schwierigkeitsgrade zur Verfügung. Dadurch können Sie sich gemäß Ihren Vorkenntnissen und Interessen an den Inhalt herantasten. Zum Beispiel erhalten Sie in den Boxen rasch fundierte Antworten auf Ihre Fragen, ohne dass Sie zuerst unzählige Seiten wälzen müssen. Ausgehend von diesen Boxen können Sie sich in den entsprechenden Kapiteln noch detaillierter informieren oder Sie können bei einem beliebigen Kapitel einsteigen und von dort aus, dank der Querverweise, die restlichen Inhalte erkunden. Schließlich können Sie das Buch aber auch als klassisches Lehrbuch und Nachschlagewerk verwenden.

Das erste Drittel (Kap. 1 bis 8) des Buches beschäftigt sich vor allem mit dem muskelphysiologischen Grundlagenwissen. Dies kann zeitweise ein bisschen trocken erscheinen, ist aber nicht minder wichtig. Halten Sie durch! Sie werden dafür mit erleuchtenden und unerwarteten Einsichten belohnt. Danach wenden wir uns den Eigenheiten und Gesetzmäßigkeiten des willentlichen Muskel(faser)gebrauchs im Krafttraining zu und gehen der Frage nach, wie Sie den Aufbau von Skelettmuskeln und Kraft durch Training und Ernährung gezielt beeinflussen können. Der Fokus liegt dabei immer auf der Übertragung der naturwissenschaftlichen Erkenntnisse in den Trainingsalltag.

Ich erhoffe mir, dass Sie von diesem Buch profitieren, indem Sie in erster Linie verstehen, wie Krafttraining, Ernährung und Muskelanpassung auf der Basis der individuellen Voraussetzungen interagieren und welche praktischen Konsequenzen sich daraus für Ihr Training und Ihr Ernährungsverhalten ergeben. Ich wünsche Ihnen eine interessante und befriedigende Reise in die wunderbare Welt des Muskeltrainings!

Danksagung

Ich danke dem Physiker Raphael Barengo für die künstlerische grafische Umsetzung meiner rohen Abbildungsvorlagen. Vielen Dank an Marko Cevic und Jan Zierold, die den Text gekonnt redigiert haben. Meinen Doktoranden und Masterstudierenden danke ich für die kritischen Diskussionen und die Beiträge zum Bildmaterial. Ich danke den Redakteurinnen des Springer-Verlags Marion Krämer und Martina Mechler für die Unterstützung und Geduld bei der Realisierung dieses Buchprojektes.

Inhalt

Vorwort	V
Gebrauchsanweisung für dieses Buch	VII
Danksagung	IX
Inhalt	XI

1	Wovon sprechen wir überhaupt? Klares Denken durch klare Begrifflichkeiten und <i>vice versa</i>	1
1.1	Muskeln kontrahieren – nicht (nur)!	1
1.2	Mäuse unter der Haut	3
1.3	Warum Skelettmuskeln keine exzentrischen Allüren haben	3
1.4	Lassen Sie sich von Äußerlichkeiten nicht täuschen	5
1.5	Die „Dreifaltigkeit“ der Kraftproduktion	6
1.6	Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Längenänderung und der Kraft eines Muskels	7
1.7	Was heißt „Training“ eigentlich und wie wird es quantifiziert?	9
1.8	Wenn Sie Gewicht verlieren wollen, fliegen Sie zum Mond!	10
1.9	Muskeln wollen nur das eine: Lasten um Gelenke drehen	10
1.10	Warum Ihre Muskeln arbeiten (müssen), obwohl sie keine Arbeit leisten	12
1.11	Was haben menschliche Muskeln mit Pferden zu tun?	13
1.12	Kraft schmeckt immer nach Newton	14
1.13	Warum Sie Ihren Trainingswiderstand nicht mit einem Projektil verwechseln sollten	15
1.14	Jogging auf der Beinpresse	16
2	Es ist nicht alles Gold, was glänzt	17
2.1	Surrogate für die interne Muskelkraft	17
2.2	Wie stark ist „stark“?	18
2.3	Maximale Kraft ist nicht gleich Spitzenkraft	18
2.4	Die Entschlüsselung der Muskelkraft	19
2.5	Muskeln im Zebrafell	24

2.6	Qual der Wahl bei der Auswahl des besten Trainingsmittels?	24
2.7	Maschine ist nicht gleich Maschine, oder doch?	25
2.8	Die ominöse Kraftkurve	26
3	Dick und/oder lang? Eine immer wiederkehrende Frage	31
3.1	Die funktionelle Rolle der Muskellänge	31
3.2	Die funktionelle Rolle der Muskeldicke (Muskelquerschnittsfläche)	34
4	Der neuromuskuläre Ursprung der Muskelkraft	37
4.1	Die Muskeln im Gehirn	37
4.2	Wie ist die Muskelkraft „codiert“?	38
4.3	Muskelfasern arbeiten als Teil der motorischen Einheit immer im Team	40
4.4	Neuromuskuläre Einzugsgebiete	40
4.5	Worin sich motorische Einheiten unterscheiden können	41
5	Ein Bouquet an zellulärer Diversität	45
5.1	Die farbige Welt der Muskelfasern	45
5.2	Molekulare Motoren des Muskels	46
5.3	Fasertypspezifische Motorklassen	48
5.4	Verteilung der Muskelfasertypen beim Menschen: Wodurch wird sie bestimmt?	50
5.5	Veränderung der Verteilung von Muskelfasertypen durch Training bzw. Inaktivität	54
5.6	Warum Sie pliometrisch mehr Kraft produzieren können als miometrisch	55
6	Muskuläre Energiebündel	59
6.1	Die Dynamik des muskulären Energieverbrauchs	59
6.2	Abstimmung von Angebot und Nachfrage	59
6.3	Muskelfasern haben mehrere Ressourcen zur Regeneration von Energie	60
6.4	Das phosphagene System: ein Feuerwerk an Energie	61
6.5	Das glykolytische System: die zuckersüße ATP-Regeneration	63
6.6	Die mitochondriale Atmung: wozu wir Sauerstoff brauchen	68
6.7	Mitochondrien: klein, aber oho!	70
6.8	Integration der drei Systeme zur Regeneration von ATP	71
7	Warum Sie beim Training ermüden	75
7.1	Die verschiedenen Komponenten der neuromuskulären Ermüdung	75
7.2	Metaboliten als Ermüdungsmediatoren	75
7.3	Mikrotraumata als Ermüdungsmediatoren	76
7.4	Vom Muskelmäuschen zum Muskelkater	77

8	Das molekulare und zelluläre Muskeluniversum	79
8.1	Muskelregeneration: ein Balanceakt	79
8.2	DNA: das Muttermolekül aller (Muskel-)Proteine	80
8.3	Alle Muskelfasern sind Muskelzellen aber nicht alle Muskelzellen sind Muskelfasern	84
8.4	Wenn Satellitenzellen geweckt werden	85
8.5	Die Gabe zur Selbsterneuerung	85
8.6	Muskelspindeln enthalten auch Muskelfasern	91
8.7	Charakterisierung von menschlichem Muskelgewebe	91
9	Wie Sie beeinflussen können, welche Muskelfasern im Training eingesetzt werden	95
9.1	Zurück zu den motorischen Einheiten	95
9.2	Wie wird die Kraft eines Muskels bei willentlicher Kraftproduktion moduliert?	96
9.3	Kriegsschauplatz der Muskeln: rekrutieren und feuern!	96
9.4	Wie codieren die Rekrutierung und die Steigerung der Feuerfrequenz die Höhe der Kraft?	97
9.5	Der tonische Rekrutierungsschwellenwert	98
9.6	Die regelhafte Rekrutierung von motorischen Einheiten	98
9.7	Mechanismus der Rekrutierung von motorischen Einheiten	100
9.8	Wo Hirn auf Muskeln trifft	102
9.9	Wie wird die Schnelligkeit der Kraftentwicklung durch Rekrutierung und Frequenzierung codiert?	103
9.10	Praxisrelevanz: Höhe der Kraft und Schnelligkeit der Bewegung	108
9.11	Wollen Sie große und starke Muskeln? Schwächen Sie sie!	110
9.12	Können Typ-2-Fasern selektiv aktiviert werden?	113
9.13	Neuroanatomische Muskelkartografie	115
10	Verborgene Facetten der Skelettmuskeln	121
10.1	Kraftübertragung zwischen Nachbarn	121
10.2	Tensionale Integrität und Mechanotransduktion: Inwiefern sind Muskelfasern integer?	122
10.3	Was haben autonome Reserven mit dem Winterschlaf zu tun?	123
10.4	Sind 100 Newton gleich 100 Newton?	124
10.5	Warum sind die neuromuskulären Verbindungen getüpfelt?	127
10.6	Nicht alle Muskelfasern verlaufen von Sehne zu Sehne	128
10.7	Ist ein größerer Muskel auch ein stärkerer Muskel?	130
11	Wenn Krafttraining auf Muskelplastizität trifft	135
11.1	Wie passen sich Muskeln durch Krafttraining an?	135
11.2	Längenadaptation (longitudinale Hypertrophie oder Atrophie) bei Tieren und Menschen	136

11.3	Breitenwachstum des Muskels (radiale Hypertrophie oder Atrophie) beim Menschen	151
12	Wie wird Skelettmuskelprotein auf- und abgebaut?	153
12.1	Aufbau von Muskelproteinmasse	153
12.2	Die Beziehung zwischen MPS und MPB	153
12.3	Wie Ihre Muskeln stündlich hypertrophieren und atrophieren	155
13	Nahrungsprotein als anaboler Stimulus	157
13.1	Der anabole Effekt von Nahrungsprotein	157
13.2	Wie viel Protein ist notwendig?	159
13.3	Warum Sie sich keine Muskeln anfuttern können	161
13.4	Das Konzept des satten Muskels	161
13.5	Aminosäuren, Proteinshakes oder Mahlzeiten?	164
13.6	Sind Kohlenhydrate im Proteinshake nötig?	165
13.7	Wie wertvoll sind Proteine in Supplementen?	166
13.8	<i>Fast and furious</i> : Was sind schnelle und langsame Nahrungsproteine?	168
13.9	Ganzkörper- ist nicht gleich Muskelproteinstoffwechsel	171
13.10	Warum nicht gleich isolierte Aminosäuren zuführen?	171
14	Krafttraining als anaboler Stimulus	173
14.1	Die akute anabole Muskelreaktion auf Krafttraining	173
14.2	Brückenschlag zwischen Muskelproteinsynthese und Rekrutierung motorischer Einheiten	174
14.3	Wie wirkt sich die Trainingsintensität auf die Muskelproteinsynthese aus?	175
14.4	Die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Trainingslast und dem akuten Anstieg der Muskelproteinsynthese	176
14.5	Welchen Einfluss hat die muskuläre Spannungsdauer auf den Anabolismus des Muskels?	176
14.6	Was ist effektiver: Einsatz- oder Mehrsatztraining? – eine sinnlose Frage	178
14.7	Der Schlüssel zum Muskelwachstum	180
14.8	Der Unterschied zwischen der Zeit bis zum Kraft- bzw. Positionsabfall, der Spannungsdauer und der Anzahl an Wiederholungen	184
14.9	„Mehrsatztraining“ – ein polyvalenter Begriff	185
14.10	Ist pliometrisch (exzentrisch) effektiver als miometrisch (konzentrisch)?	187
14.11	Skelettmuskeln haben auch ein „Sättigungsgefühl“	188
15	Hemmt Ausdauertraining das Muskelwachstum?	189
15.1	Warum die Muskelproteinsynthese bei gleichzeitigem Energienstress keine Priorität genießt	189
15.2	Fehlkonzept der Periodisierung	189

15.3	Was ist das optimale Zeitintervall, mit dem ein bestimmter Muskel trainiert werden soll?	191
15.4	Fehlkonzept der Superkompensation	192
16	Die Jagd nach hormonellen Geistern	195
16.1	Ganzkörper- oder Splittraining?	195
16.2	Warum Testosteron als anaboles Hormon überbewertet ist	196
16.3	Wie beeinflusst Krafttraining die Blutkonzentration von anabolen Hormonen?	197
17	Männer sind keine Marsianer und Frauen keine Venusianer	203
17.1	Was hat die Planetenkunde mit dem geschlechtsspezifischen Muskelaufbau zu tun?	203
17.2	Wie die Antibabypille Ihre Muskelmasse beeinflussen kann	205
17.3	XXY	206
18	Spezifität der Anpassung an Training	207
18.1	Profitiert Ihr rechter Arm, wenn Sie den linken trainieren? ..	207
18.2	Wer beißt wen – das Krafttraining das Ausdauertraining oder umgekehrt?	207
18.3	Anfangs mit der Schrotflinte, später mit dem Präzisionsgewehr	208
18.4	Exercenticals	209
19	Die synergistische Beziehung zwischen Krafttraining und der Zufuhr von Nahrungsprotein	211
19.1	Die Interaktion zwischen Krafttraining und der Zufuhr von Nahrungsprotein	211
19.2	Proteinzufuhr: Am besten vor, während oder nach dem Krafttraining?	214
19.3	Beeinträchtigt Krafttraining die Proteinverdauung?	218
19.4	Ist unmittelbar nach dem Krafttraining eine Kohlenhydratzufuhr nötig, um die MPS zu maximieren oder die MPB zu minimieren?	219
19.5	Ist die anabole Reaktion des Muskels schwächer, wenn Sie mit relativ leeren Muskelglykogenspeichern trainieren?	220
19.6	Übertrag von Akut- zu Langzeiteffekten?	223
20	Warum Muskeltraining nicht optional ist	229
20.1	Die verborgenen Seiten der Skelettmuskulatur	229
20.2	Training in der Schwangerschaft	232
20.3	„Ab 25 Jahren geht es mit Kraft und Muskeln abwärts“ – wer’s glaubt!	232
20.4	Die anabole Resistenz im Alter	233
20.5	Der Anti-Aging-Effekt von Krafttraining	236

21	Was macht Sie letzten Endes ästhetisch?	241
21.1	Der Unterschied zwischen Muskel- und Körpermasse	241
21.2	Wenn messen, dann richtig	242
21.3	Über Problemzonen und Cellulitis	244
21.4	Gibt es den optimalen Tageszeitpunkt für Muskeltraining?	248
21.5	Der Weg vom Trainingsreiz zur Muskeladaptation	251
22	Laune der Natur: Das Ausmaß der Anpassung an Training ist individuell	253
22.1	Die interindividuelle Variabilität der Anpassung an das Training – das neue Mantra?	253
22.2	Doppelt so viel Muskelmasse – ohne Training!	255
22.3	Was darf man im Mittel an Muskelwachstum erwarten?	257
22.4	Warum wir auch im Training manchmal Ursache und Wirkung verwechseln	258
23	Packen Sie es an!	261
Literatur		263
Sachverzeichnis		273

1

Wovon sprechen wir überhaupt? Klares Denken durch klare Begrifflichkeiten und *vice versa*

1.1 Muskeln kontrahieren – nicht (nur)!

Was kommt Ihnen beim allgemein bekannten Begriff „Muskelkontraktion“ als Erstes in den Sinn? Nun, ich muss kein Hellseher sein, um zu erraten, dass Sie dabei automatisch an das Zusammenziehen bzw. die Verkürzung des Muskels denken. Dies ist nicht weiter erstaunlich. Auch die Definition im *Duden Fremdwörterbuch* lautet „(Med.) das Sichzusammenziehen (bes. von Muskeln)“. Leider ist diese Definition völlig unzureichend, um die Muskelfunktion zu beschreiben, und verleitet zu falschen Vorstellungen. Warum?

Stellen Sie sich vor, Sie stehen aufrecht, Ihre Arme hängen seitlich am Körper und in der rechten Hand halten Sie eine Hantel. Die gewählte Hantelmasse können Sie erfahrungsgemäß ohne Schwierigkeiten mehrmals auf- und abbewegen. Nun führen Sie die Hantel zum Kinn, und zwar so, wie Sie auch einen Apfel zum Mund führen. Was geschieht bei dieser Beugebewegung? Beim Anheben (Heranziehen) der Hantel produzieren unter anderem die Armbeugermuskeln Kraft, während sich die Unterarmknochen, an denen die Muskeln über Sehnen befestigt sind, dem Oberarmknochen und Schulterblatt nähern. Von außen betrachtet kommt es zur Muskelverkürzung, der Winkel zwischen Ober- und Unterarm wird kleiner. Und wie gelangt nun die Hantel wieder in die Ausgangsposition? In diesem Fall gelingt dies, indem Sie die aufgebrachte Kraft willentlich reduzieren. Dadurch verkleinert sich das muskuläre Drehmoment im Vergleich zum externen Drehmoment – die Hantel bewegt sich infolgedessen in die Ausgangsposition zurück. Beim Absenken (Bremsen) generieren die Armbeugermuskeln daher ebenfalls Kraft, sie werden dabei äußerlich betrachtet aber länger und der Winkel zwischen Ober- und Unterarm wird größer. Wenn Sie an den Umkehrpunkten zwischen Beugung und Streckung (oder *vice versa*) kurz innehalten, während Sie gegen die Hantel halten, so ist von außen zwar keine Bewegung sichtbar, Ihre Muskeln generieren aber trotzdem ununterbrochen Kraft.

Es gibt aber auch eine zweite Möglichkeit, wie Sie die Hantel in die Ausgangsposition (gestreckte Arme seitlich am Körper, Hände seitlich der Hüfte)

bringen können. Stellen Sie sich hierzu vor, dass Sie – an Ihren Füßen befestigt – kopfüber an einer Reckstange hängen, die Hantel noch immer mit gebeugtem Unterarm am Kinn haltend. In diesem Fall gelangen Sie in die Ausgangsposition, indem der Gegenspielermuskel (der sogenannte Antagonist) des Armbeugers, der Armstreckermuskel, die Hantel durch Streckung im Ellbogengelenk zurückbewegt. Dabei produziert hauptsächlich der Armstreckermuskel Kraft, und verkürzt sich (Außensicht). Als Resultat wird der Winkel zwischen Ober- und Unterarm größer. Die Wirkungsabsicht mancher Muskeln, zum Beispiel des Armbeugers, ist demnach, dass sie den Winkel zwischen Ober- und Unterarm (Winkel des Ellbogengelenks) reduzieren. Bei anderen Muskeln wie den Armstreckern ist dies genau umgekehrt.

Was lernen wir aus diesen Betrachtungen? Die Muskeln *versuchen*, sich zu verkürzen, die Verkürzung ist aber nicht unbedingt das Resultat. Je nach Krafteinsatz oder Höhe der zu überwindenden Kraft kann das Ergebnis auch eine relative Verlängerung oder keine Längenänderung sein (*notabene* immer von außen betrachtet). Die Gleichsetzung von Muskelkontraktion mit Muskelverkürzung greift daher viel zu kurz. Wenn Sie sich beim Training Ihrer Muskeln ausschließlich auf die muskelverkürzende Bewegungsphase konzentrieren, weil Sie denken oder Ihnen gesagt wurde, dass Ihre Muskeln nur in dieser Bewegungsphase arbeiten, so vernachlässigen Sie die für den Trainingserfolg ebenso wichtigen anderen Einsatzformen. Zudem blenden Sie aus, dass gerade der Aspekt der neuronalen Aktivierung und Kraftproduktion (unabhängig von der Richtung der Längenänderung) zentral für die Trainingsanpassungen ist. Und wenn Muskelkontraktion gleich Muskelverkürzung sein soll, wie bitte soll die häufig gebrauchte Begriffskombination „isometrische Muskelkontraktion“ verstanden werden? Genau! Gar nicht, denn „isometrisch“ – „iso-“ (gr. *isos* für ähnlich, entsprechend, gleich) und „-metrisch“ (auf den Meter als Längeneinheit bezogen) – bedeutet so viel wie „gleiche Länge“, was im Widerspruch zur Muskelkontraktion steht, wenn sie als Muskelverkürzung verstanden wird.

Box 1.1 Was der Begriff „funktionelles Training“ wirklich bedeutet

Im Kontext der menschlichen (Fort-)Bewegung ist die eigentliche Funktion von Skelettmuskeln, Kraft zu produzieren. Dies geschieht unabhängig davon, ob dabei eine äußerlich sichtbare Bewegung entsteht. Der Muskel versucht zwar, sich während des Vorgangs der Kraftproduktion zu verkürzen, Resultat dieses Versuchs ist aber nicht in jedem Fall eine Verkürzung. Aus dieser gründlichen aber einfachen Definition der Muskelfunktion lässt sich bereits die erste und vielleicht wichtigste Folgerung für Ihr Training ableiten: Wenn Sie die Muskelfunktion durch Training verbessern wollen, so müssen Sie während des Trainings diese Funktion stören bzw. schwächen. Was heißt das? Ziel des Trai-

nings muss sein, den Muskel in seiner Funktion zu ermüden bzw. zu erschöpfen (s. Abschn. 9.11). Irgendwann in Ihrer Trainingseinheit (wir werden später sehen, wann) sollten Sie an den Punkt kommen, wo Sie den Trainingswiderstand (sei dies Ihr Körper, eine Hantel oder der Gewichtsblock des Geräts) trotz maximaler und andauernder Anstrengung nicht mehr beschleunigen, halten oder bremsen können. Das Ziel des Trainings besteht also in einer vorübergehenden starken Schwächung Ihrer Muskeln.

1.2 Mäuse unter der Haut

Übrigens, etymologisch lässt sich der Begriff „Muskel“ vom lateinischen Wort *musculus* (Mäuschen) herleiten, denn das Bild von sich anspannenden Muskeln gleicht der Vorstellung von unter der Haut rennenden Mäusen. Historisch betrachtet sind die ersten Erklärungsversuche zur Funktionsweise von Muskeln auf den griechischen Arzt Hippokrates (460–377 v. Chr.) datiert. Es war aber Galen (129–216 n. Chr.), ein Arzt aus Pergamon (heute Bergama, Türkei), der versuchte, die Muskelfunktion mechanistisch zu erklären. So postulierte er unter anderem, dass sich im Gehirn eine Substanz befände (lat. *spiritus animalis*), die in der Lage sei, durch die Nerven, die man sich hohl vorstellte, in die Muskeln zu fließen und diese zu expandieren. Dadurch würden, gemäß seiner Vorstellung, die Muskeln aktiviert. Diese Theorie war so durchdringend, dass sie bis ins 17. Jahrhundert Bestand hatte. Erst Swammerdam zeigte 1663 anhand eines eleganten neurophysiologischen Versuchs, dass ein isolierter Muskel bei Stimulation sein Volumen nicht vergrößert. Damit war die Theorie von Galen experimentell widerlegt. Scheinbar wurde dabei aber das ebenso klare Resultat übersehen, dass es bei einer Stimulation ebenso wenig zu einer Volumenverkleinerung (d. h. Volumenkontraktion) des isolierten Muskels kommt. Trotzdem kann sich bis heute der unpassende Ausdruck der Muskelkontraktion hartnäckig halten. Sie wissen es jetzt aber besser: Verwenden Sie statt „Kontraktion“ einfach „Kraftproduktion“!

1.3 Warum Skelettmuskeln keine exzentrischen Allüren haben

Nebst „isometrisch“ werden auch die beiden Adjektive „konzentrisch“ und „exzentrisch“ sehr häufig mit dem Substantiv „Muskelkontraktion“ kombiniert, nur sind diese beiden Adjektive im Kontext der Skelettmuskelaktivität noch sinnloser als die genannte „Muskelkontraktion“. „Konzentrisch“ bedeu-

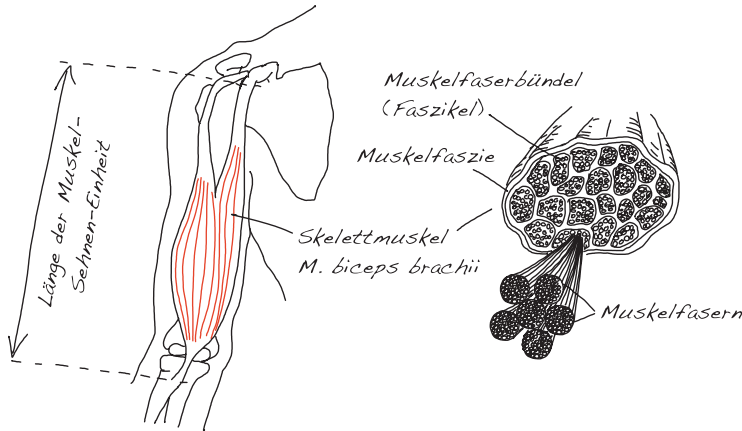


Abb. 1.1 Muskel-Sehnen-Einheit und Aufbau des Skelettmuskels. Beachten Sie, dass unter gegebenen Umständen die Länge der Muskel-Sehnen-Einheit bei gleichzeitiger Muskelverkürzung zunehmen kann. Die Länge der Muskel-Sehnen-Einheit ist daher nicht gleichbedeutend mit der Muskellänge. Ein Skelettmuskel besteht aus vielen Bündeln von einzelnen Muskelfasern (Faszikel)

tet so viel wie „einen gemeinsamen Mittelpunkt habend“ (auf Kreise bezogen) während „exzentrisch“ mit „außerhalb des Mittelpunktes (von Kreisen) liegend“ übersetzt werden kann. Während diese beiden geometrischen Begriffe zwar mit den physiologischen oder pathologischen Anpassungsformen des Herzmuskels, bzw. der Herzkammern vereinbar sind, ergeben sie im Kontext der Herzmuskel- und Skelettmuskelfunktion keinen Sinn. Auch wenn eine Herzvergrößerung exzentrischer Natur ist (z. B. eine nur linksventrikuläre Herzvergrößerung) und der Herzmuskel dann unter exzentrischen Bedingungen Kraft produziert, werden dabei die Muskelfasern immer kürzer, bleiben gleich lang oder werden unter speziellen Umständen gedehnt. Die weitere Bedeutung von „exzentrisch“ als „auf übertriebene Weise ungewöhnlich“, macht die Begriffskombination „exzentrische Kontraktion“ dann endgültig zum Kuriosum.

Sie fragen sich vielleicht, warum ich ständig die Außensicht hervorhebe. Die Antwort lautet: weil sich im Inneren ganz andere Vorgänge abspielen können. Die vielen Muskelfasern (d. h. die mehrkernigen Muskelzellen) sind in Bündeln (Faszikeln) organisiert und in ein Netzwerk aus Bindegewebe, gemeinhin auch als extrazelluläre Matrix bezeichnet, eingebettet. Außen ist der Muskel von einer Schicht derben Bindegewebes (Muskelfaszie) umgeben. Muskelfasern und extrazelluläre Matrix sind über den Muskel-Sehnen-Übergang mit den Sehnen verbunden, welche wiederum das Bindeglied zum Knochen darstellen. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Muskel-Sehnen-Einheit (Abb. 1.1).

1.4 Lassen Sie sich von Äußerlichkeiten nicht täuschen

Wenn von außen betrachtet, zum Beispiel im Fall der Armbeugermuskeln, der Gelenkwinkel zwischen Ober- und Unterarm kleiner wird, so spricht man davon, dass sich der Muskel verkürzt. Genau genommen verkürzt sich aber die Muskel-Sehnen-Einheit und nicht in allen Fällen zwingend auch der Muskel bzw. die Muskelfaszikel. Wie das? Denken Sie an den zweibeinigen Sprung. Diesen Sprung können Sie aus dem Stand einleiten. Dabei schwingen Sie mit den Armen und gehen gleichzeitig in die Knie (Ausholbewegung), um dann unmittelbar in die Höhe zu schnellen. Man spricht in diesem Fall von einem *countermovement jump*. Solche Ausholbewegungen beinhalten definitionsgemäß einen Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus, in diesem Fall für die Kniestreckermuskeln. Für Dehnungs-Verkürzungs-Zyklen ist es typisch, dass aufgrund der höheren Vorspannung zu Beginn der Verkürzung der Muskel-Sehnen-Einheit (d. h. am Ende der Ausholbewegung in der Hocke) die Sehrendehnung größer ist als die Faszikeldehnung. Dies bedeutet, dass sich die Faszikel der Kniestreckermuskeln verkürzen, bevor im Kniegelenk eine Bewegung stattfindet (d. h. die Muskel-Sehnen-Einheit verändert in dieser Phase ihre Länge nicht). Während des Sprungs bleibt die Faszikellänge dann relativ konstant, während die Sehnen mit hohem Speed zurückschnellen (die Muskel-Sehnen-Einheit wird dabei kürzer). Müssten sich die Muskeln bei hoher Geschwindigkeit verkürzen, um die Sprungbewegung zu vollbringen, dann wäre die Muskelkraft gering (s. Abschn. 1.6).

Die schnelle Verkürzung der Muskel-Sehnen-Einheit hängt daher bei Dehnungs-Verkürzungs-Zyklen primär von der Verkürzung der Sehne ab. Im Gegensatz dazu ist die Verkürzung der Muskel-Sehnen-Einheit der Kniestreckermuskeln bei Bewegungen ohne Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus, zum Beispiel bei einem zweibeinigen Sprung ohne Ausholbewegung (d. h. in der Hocke startend), primär auf die Verkürzung der Muskelfaszikel zurückzuführen (mehr oder weniger gleichbleibende Sehnenlänge; Cormie et al. 2011). Gleichzeitig verhält sich bei dieser Sprungart die Wadenmuskulatur (speziell der mediale Kopf des Zwillingswadenmuskels, *M. gastrocnemius medialis*) wie die Oberschenkelmuskulatur beim Sprung mit Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus. Die Achillessehne spielt im Zusammenhang mit der Energiespeicherung und -freisetzung eine wichtige Rolle.

Wie ich Ihnen soeben erläutert habe, sind der Begriff „Muskelkontraktion“ wie auch die damit verwendeten Adjektive „konzentrisch“ und „exzentrisch“ unzulänglich bzw. falsch, um die Muskelfunktion zu beschreiben. Notwen-

dig ist eine unmissverständliche und korrekte Nomenklatur. Im englischen Sprachgebrauch hat man das Problem gelöst, indem man ganz einfach die Adjektive *shortening* (kürzer machend), *lengthening* (länger machend) oder *isometric* vor *muscle action* (Muskelwirkung, Muskeleinsatz) setzt. Man beschreibt also das Resultat der Muskelfunktion. Die Funktion des Muskels ist, wie bereits vorher erwähnt, Kraft zu produzieren. Dabei versucht er, sich zu verkürzen. Die Umsetzung einer korrekten Begrifflichkeit in die deutsche Sprache ist schwieriger. Wer würde schon „(die Muskel-Sehnen-Einheit) kürzer machende Muskelwirkung“ statt „konzentrische Kontraktion“ verwenden, auch wenn Ersteres richtig ist?

1.5 Die „Dreifaltigkeit“ der Kraftproduktion

Bereits 1938 erkannten Hubbard und Stetson, dass Muskeln ihre Funktion unter drei Bedingungen wahrnehmen können. Sie nannten diese drei Bedingungen „miometrisch“, „isometrisch“ und „pliometrisch“ (Hubbard und Stetson 1938). Diese Adjektive setzen sich aus den griechischen Präfixen „mio-“ (kürzer), „iso-“ (gleich) und „plio-“ (länger) und dem Wort „-metrisch“ zusammen und bringen das Resultat der Kraftwirkung bzw. des Krafteinsatzes auf die Länge der Muskel-Sehnen-Einheit exakt auf den Punkt. Für den Rest des Buches werde ich daher statt von „konzentrischer, isometrischer, exzentrischer Kontraktion“ von „miometrischer, isometrischer, pliometrischer Kraftproduktion“ sprechen.

Wie können Sie sich merken, für welche Längenänderung „miometrisch“ und „pliometrisch“ stehen („isometrisch“ ist ja im Sprachgebrauch bereits etabliert)? Ganz einfach: Im Wort „pliometrisch“ kommt der Buchstabe „l“ für „länger“ oder „lang“ vor. Seien Sie sich beim Lesen immer bewusst, dass die Adjektive in erster Linie die Längenänderung der Muskel-Sehnen-Einheit beschreiben. Im Buch wird auch häufig von Muskelfasern die Rede sein. Im Kontext von einzelnen Muskelfasern oder Muskelfaserbündeln beziehen sich die Adjektive folglich auf die Länge dieser Strukturen. Beachten Sie schließlich, dass das hier verwendete Adjektiv „pliometrisch“ nicht mit dem falsch verwendeten Begriff des „plyometrischen Trainings“ in Verbindung gebracht werden darf. Plyometrisches Training (engl. *plyometrics*) wird fälschlicherweise leider oft für Sprungtraining bzw. Training mit Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus verwendet.

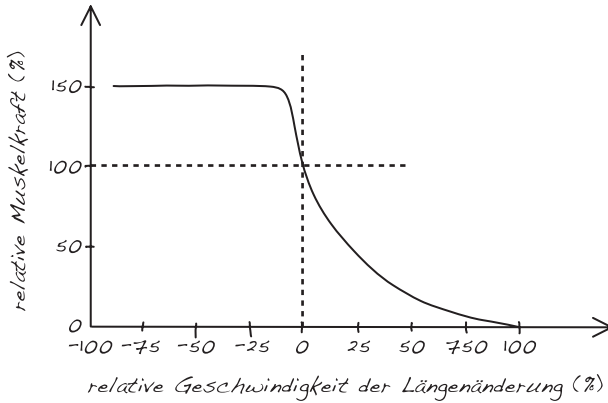


Abb. 1.2 Geschwindigkeit-Kraft-Relation für einen Skelettmuskel. Beachten Sie, dass die Muskelkraft bei negativer Geschwindigkeit der Längenänderung (d. h. bei pliometrischer Aktivität) zunächst rapide zunimmt, sich dann im weiteren Verlauf nicht mehr verändert und mit zunehmender (positiver) Verkürzungsgeschwindigkeit (d. h. bei miometrischer Aktivität) stark abnimmt. Bei der Muskelkraftproduktion mit einer Verkürzungsgeschwindigkeit von Null spricht man von isometrischer Muskelaktivität

1.6 Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Längenänderung und der Kraft eines Muskels

Einerseits beschreibt die Geschwindigkeit-Kraft-Relation (Hill 1922; Katz 1939; Abb. 1.2) den Umstand, dass ein Muskel mit zunehmender Verkürzungsgeschwindigkeit weniger Kraft produziert. Umgekehrt bedeutet dies, dass ein Muskel bei Verkürzung nur eine große Kraft produzieren kann, wenn die Verkürzungsgeschwindigkeit gering ist. Sie kennen das aus Ihrer täglichen Erfahrung: Ein Bleistift (geringe Last, wenig Muskelkraft) lässt sich schneller bewegen als ein Baumstamm (hohe Last, viel Muskelkraft), auch wenn Sie in beiden Fällen versuchen, den Widerstand möglichst schnell zu bewegen. Andererseits beschreibt die Geschwindigkeit-Kraft-Relation, dass bei negativer Verkürzungsgeschwindigkeit, das heißt bei Dehnung, mit zunehmender Dehnungsgeschwindigkeit bis zu einem Plateau zunehmend mehr Kraft produziert wird, und zwar mehr, als isometrisch möglich ist. Auch dieses Phänomen kennen Sie aus der Praxis. Wenn Sie die Hantel im Training jeweils senken (bremsender Teil der Bewegung bzw. negative Verkürzungsgeschwindigkeit), fühlt sich die Last leichter an, weil der Muskel in diesem Kraftproduktionsmodus stärker ist.

Die Höhe der generierten Muskelkraft hängt also von der Geschwindigkeit der Längenänderung des Muskels ab, dies aber gleich in zweierlei Hinsicht: Richtung und Betrag.

Richtung Konventionsgemäß ist bei der Kraftproduktion mit Muskelverkürzung die Geschwindigkeit positiv, während sie bei der Kraftproduktion mit Muskeldehnung negativ ist. Davon abgeleitet sind übrigens Begriffe wie „positive oder negative Bewegungsphase“ und „Negativtraining“. Bei einer Geschwindigkeit der Längenänderung von Null findet die Kraftproduktion isometrisch statt.

Betrag Bei miometrischer Kraftproduktion können Sie den zu bewegenden physikalischen Körper schneller bewegen, wenn seine Gewichtskraft im Verhältnis zur augenblicklich verfügbaren willkürlichen Spitzenkraft klein ist. Während der pliometrischen Kraftproduktion ist es so, dass der Speed der Längenänderung (in diesem Fall der Dehnung) größer ist, wenn die Gewichtskraft des Objektes relativ zur augenblicklich verfügbaren willkürlichen Spitzenkraft groß ist. Anders gesagt: Je schwerer die Hantel bei gegebener Muskelkraft oder je ermüdet Ihr Muskel bei gegebener externer Last ist, desto schneller ist die Abbremsbewegung.

Box 1.2 Was können Sie aus der beschriebenen Geschwindigkeit-Kraft-Relation für Ihr Training ableiten?

Sie können zwei Dinge ableiten: Erstens ist bei schneller miometrischer Kraftproduktion die produzierte Muskelkraft relativ klein. Umgekehrt gilt: Je langsamer die Verkürzungsgeschwindigkeit, desto mehr Kraft kann der Muskel produzieren. Davon ausgehend, dass für die Muskelkräftigung im Training hohe interne Kräfte förderlich sein können, sollte die Trainingslast bei der Muskelverkürzung langsam bewegt werden. Zweitens ist die Muskelkraft bei maximaler Aktivierung während der pliometrischen Kraftproduktion (unabhängig von der Dehnungsgeschwindigkeit) immer größer als bei isometrischer oder miometrischer Kraftproduktion. Versuchen Sie während des Trainings zu jedem Zeitpunkt, langsam zu bewegen, auch wenn das nicht immer das sichtbare Resultat ist.

Als Beispiel beschreibe ich hier die Durchführung von Negativklimmzügen (Negativtraining). Wenn Sie weniger als vier anatomisch perfekt und langsam ausgeführte Klimmzüge schaffen, reichen für dieses Experiment eine Klimmzugstange und eine kleine Treppe vollends aus. Steigen Sie die Treppe hoch und halten Sie sich mit Untergriff an der Stange fest, sodass Ihr Kinn bei geradem Nacken höher als die Stange ist und sich Ihr Unter- und Oberarm sowie die Schulter auf jeder Seite in einer Ebene befinden. Winkeln Sie nun die Unterschenkel an und überkreuzen Sie die Füße, während Sie sich noch immer fest in der Ausgangsposition halten. Sie hängen jetzt sprichwörtlich in der Luft. Versuchen Sie nun, die Abwärtsbewegung Ihres Körpers gleichmäßig und langsam

(in ca. 10 s) abzubremsen. Lassen Sie den Griff nicht los, wenn Sie unten angelangt sind und steigen Sie unverzüglich und schnell über die Treppe wieder in die Ausgangsposition hoch. Wiederholen Sie den Bremsvorgang. Sie werden feststellen, dass die Abwärtsbewegung mit zunehmender Anzahl an Bremsvorgängen (d. h. Wiederholungen) immer schneller vonstatten geht, obwohl Sie mit maximaler willkürlicher Kraftanstrengung versuchen, Ihren Körper langsam zu bremsen. Nach ein paar Wiederholungen werden Sie quasi ungebremst, das heißt in weniger als 1 s, in die Tiefe fallen – dieser Zeitpunkt entspricht dann dem Übungsende.

1.7 Was heißt „Training“ eigentlich und wie wird es quantifiziert?

Nachdem wir nun die Bewegungsfunktion von Muskeln geklärt haben, sind wir besser in der Lage, die Bedeutung des Begriffs „Training“ unter die Lupe zu nehmen. Training (engl. *exercise*) ist die potenzielle Störung der Homöostase durch Muskelaktivität, die entweder ausschließlich oder in Kombination miometrischer, isometrischer oder pliometrischer Natur ist. Diese Definition berücksichtigt, dass einerseits die Störung von Stoffwechselvorgängen wahrscheinlich ist, dass andererseits Bewegung aber nicht unbedingt ein Resultat sein muss. Zudem kann die Definition auf alle Situationen und alle Muskeln (Herzmuskulatur, glatte Muskulatur und Skelettmuskulatur) angewendet werden. Diese Definition ist übrigens auch auf den Begriff „körperliche Aktivität“ anwendbar. Der Unterschied zwischen Training und körperlicher Aktivität besteht also im unterschiedlichen Kontext der Muskelaktivität und der damit zusammenhängenden unterschiedlichen Interpretation der Motivation bzw. der Absicht des Individuums.

Die nächste Frage ist nun, wie Training quantifiziert werden kann. Die Antwort auf diese Frage finden wir im internationalen Einheitensystem (frz. *Système International d'Unités*, SI). Das SI wurde 1960 als zwölfte Beschlussfassung der elften Generalversammlung über Gewichte und Maße eingeführt. Es wird vom internationalen Mass- und Gewichtsbüro (frz. *Bureau International des Poids et Mesures*, <http://www.bipm.org>) verwaltet, welches alle paar Jahre das zum SI gehörende Referenzregelwerk (die SI-Broschüre) publiziert. Darin sind die international anerkannten und für alle Messungen geltenden Größen, Einheiten und Symbole festgelegt. In der Wissenschaft ist das Befolgen des SI zwingend, denn nur so kann man beispielsweise Messresultate aus den unterschiedlichsten (Labor-)Ecken dieser Erde miteinander vergleichen. In der Trainingspraxis sollte man zumindest unterscheiden können, welche Begriffe SI-konform sind und welche keinen Sinn ergeben.

1.8 Wenn Sie Gewicht verlieren wollen, fliegen Sie zum Mond!

Wie gesagt, eine wichtige Funktion von Muskeln ist, Kraft auszuüben. Natürlich nehmen Muskeln auch andere fundamentale Funktionen für unser (Über-)Leben wahr, auf die ich später eingehen werde. Doch was ist Kraft überhaupt? Im Jahre 1687 publizierte Isaac Newton sein Werk *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie). Darin formulierte er drei Grundsätze bzw. Gesetze der Bewegung. Das Konzept der Kraft stammt vom ersten der drei Newton'schen Gesetze, dem Trägheitsgesetz. Es besagt, in einfachen Worten ausgedrückt, Folgendes: Kraft ist, was dahingehend wirkt, den Ruhezustand oder den gleichförmigen geradlinigen Bewegungszustand (d. h. eine Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit und ohne Richtungsänderung) zu verändern. Die SI-Einheit der Kraft ist das Newton (N). Im Fall der linearen Bewegung, das heißt einer Bewegung entlang einer geraden Linie, tendiert eine auf ein stationäres oder sich bewegendes Objekt applizierte Kraft also dazu, das Objekt zu beschleunigen. Das „Widerstreben“ oder eben die Trägheit des Objektes, seinen Zustand zu ändern, ist auf seine Masse zurückzuführen.

Die SI-Einheit für Masse ist das Kilogramm (kg). Aufgrund des Effektes der Gravitation (der Schwerkraft) übt die Masse eine Kraft aus und diese Kraft entspricht dem Gewicht des Objektes. Die beide Größen „Gewicht“ und „Masse“ werden oft nicht voneinander unterschieden, speziell wenn es um unsere Körpereigenschaften geht. Das Körpergewicht ist eine Kraft und sollte daher in Newton angegeben werden, die Körpermasse hingegen in Kilogramm. Wenn Ihre Körpermasse 80 kg beträgt, dann ist Ihr Körpergewicht auf der Erde ca. 800 N. Wenn Sie Körpergewicht verlieren wollen, fliegen Sie zum Mond. Dort werden Sie ca. sechsmal weniger wiegen als auf der Erde. Scherz beiseite, es ist eher anzunehmen, dass Sie Fettmasse verlieren und Muskelmasse zulegen wollen, und ich hoffe, dass Sie der Inhalt meines Buches dabei unterstützen kann.

1.9 Muskeln wollen nur das eine: Lasten um Gelenke drehen

Gerade im Kontext von Training sind wir aber nicht primär an den linearen, sondern den angularen Effekten der Kraft interessiert. Wenn Sie einen Apfel mit einer Hand zum Mund führen, so rotiert die Hand dabei um das Ellbogengelenk, das heißt der Apfel bewegt sich kreisförmig und nicht linear um das Ellbogengelenk. Auch wenn Sie einen Gegenstand mehr oder weniger

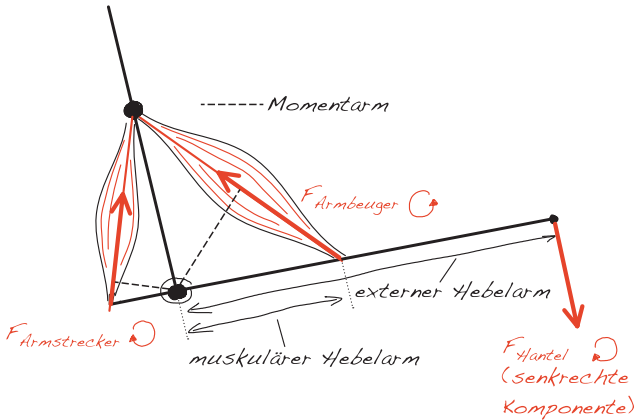


Abb. 1.3 Kräfte, die bei einem Bizepscurl mit einer Hantel wirken. Die Muskel-Sehnen-Einheit der Armbeuger verkürzt sich (miometrische Kraftproduktion) nur dann, wenn das muskuläre Drehmoment (Produkt aus dem Betrag des Momentarms und des muskulären Hebelarms) der Armbeuger größer ist als die Summe der Drehmomente, die durch den Trainingswiderstand (Hantel) sowie die Armstreckermuskulatur verursacht werden. Das externe Drehmoment entspricht dem Produkt aus dem Betrag der zum Unterarm senkrecht stehenden Gewichtskraftkomponente der Hantel und dem externen Hebelarm

entlang einer Linie bewegen (z. B. beim Hochdrücken einer Hantel), kommt die geradlinige Bewegung der Hantel nur durch gleichzeitige Rotation des Oberarmknochens im Schultergelenk und der Unterarmknochen im Ellbogengelenk zustande. Die Wirkung eines Muskels manifestiert sich folglich als Drehmoment um das entsprechende Gelenk und nicht als lineare Kraft. Das Widerstreben des Körpers seine Winkelbewegung zu ändern, nennt man Trägheitsmoment. Das Trägheitsmoment wiederum hängt von der Masse des physikalischen Körpers und der Verteilung dieser Masse um die Rotationsachse ab. Das muskuläre Drehmoment berechnet sich aus dem vektoriellen Kreuzprodukt zwischen Momentarm und der wirkenden Kraft. Der Momentarm stellt wiederum den Betrag der zum Drehpunkt des Gelenks senkrecht stehenden Muskelkraftkomponente dar, während der Hebelarm dem Abstand zwischen dem Gelenkmittelpunkt und der Kraftansatzstelle am zu bewegenden Knochen entspricht (im Beispiel des *M. biceps brachii*, dem zweiköpfigen Armmuskel, entspricht dies der Sehnenansatzstelle am Unterarmknochen). Einfach gesagt handelt es sich beim Momentarm um die senkrecht zur Wirkungslinie der Muskelkraft stehende Distanz von der Wirkungslinie zum Drehpunkt (Gelenk).

Die SI-Einheit des Drehmoments ist das Newtonmeter (N m). Das muskuläre Drehmoment wirkt dem Drehmoment entgegen, welches durch die externe Kraft erzeugt wird (Abb. 1.3). Wenn Sie also eine Hantel in der Hand halten, so entspricht das externe Drehmoment dem Produkt aus dem Betrag

der *senkrecht* zum Unterarm wirkenden Gewichtskraftkomponente der Hantel und dem Abstand der Hantel zum Zentrum des Ellbogengelenks. Grob gesagt entspricht dieser Abstand der Länge Ihres Unterarmknochens. Aus diesen Betrachtungen wird klar, warum Sie während des Hebens einer Hantel (Beugung im Ellbogengelenk) in derjenigen Gelenkposition am meisten Widerstand verspüren, bei der der Unterarmknochen waagrecht zur Erdoberfläche steht: An der Stelle wirkt die Gewichtskraft der Hantel ausschließlich senkrecht auf den Unterarmknochen. Ist das muskuläre Drehmoment eines Muskels (z. B. des Armbeugermuskels, M. brachialis) größer als das externe Drehmoment und auch größer als das Drehmoment des Antagonistenmuskels (in diesem Fall des Armstreckers, M. triceps brachii), so ist die resultierende Muskelwirkung miometrischer Natur. Im umgekehrten Fall ist der Muskeleinsatz pliometrisch. Halten sich die entgegengesetzten Drehmomente die Waage, so kommt es zu keiner äußerlich sichtbaren Bewegung (isometrischer Fall).

1.10 Warum Ihre Muskeln arbeiten (müssen), obwohl sie keine Arbeit leisten

Bewegt sich der Angriffspunkt einer Kraft so, dass die Bewegungsrichtung ganz oder teilweise in der Linie der Krafrichtung liegt, wird mechanische Arbeit verrichtet. Folglich berechnet sich die mechanische Arbeit aus dem Produkt von Kraft mal Distanz (Weg). Aber Achtung! Mechanische Arbeit wird nur dann verrichtet (d. h. das Vorzeichen der Arbeit ist positiv), wenn der zurückgelegte Weg der Krafrichtung entgegengesetzt ist. Die SI-Einheit für die Distanz ist der Meter (m). Mechanische Arbeit ist demnach durch das Produkt Newton mal Meter (N m) gegeben, was der SI-Einheit Joule (J) entspricht. Im Zusammenhang mit dem Training ist das Konzept der mechanischen Arbeit allerdings mit Vorsicht zu genießen. Denken Sie an die isometrische Muskelkraftproduktion. Wenn Sie beispielsweise aufrecht stehend eine schwere Tasche ruhig halten, so produzieren Ihre Trapezmuskeln zwar viel Kraft, die verrichtete externe mechanische Arbeit ist aber gleich Null, da sich Ihre Hände nicht von der Stelle rühren.

Grundsätzlich darf Training daher nicht mit der Verrichtung von externer mechanischer Arbeit gleichgesetzt werden. Zudem muss bei der Verwendung des Begriffs der mechanischen Arbeit immer das energetische bzw. thermodynamische System spezifiziert werden. Bei einer Bewegung kann man nämlich den ganzen Körper oder nur einzelne Glieder oder Segmente als System betrachten. Die verrichtete mechanische Arbeit entspricht dann der Nettoänderung der Energie des definierten Systems. Im Kontext von Training unter-

scheidet man daher interne und externe Arbeit. Nehmen Sie den folgenden Fall an. Auf Ihrem Schreibtisch befindet sich eine sehr schwere Hantel und Sie versuchen, diese mit maximaler Anstrengung anzuheben. Dies gelingt Ihnen aber nicht einmal ansatzweise – der Einsatz der Muskel-Sehnen-Einheit ist folglich isometrisch. Was passiert im Muskelinneren? Die Muskelfasern verkürzen sich, während sich die elastischen Komponenten der extrazellulären Matrix und die Sehnen bis zu ihrem Limit dehnen. Genau genommen verrichtet der Muskel (bzw. die Muskelfasern) mechanische Arbeit. Dies kann man als interne Arbeit bezeichnen. Dennoch, die externe mechanische Arbeit bleibt dabei gleich Null. Den Begriff „intern“ kann man auch auf die mechanische Arbeit beziehen, die allein dazu verrichtet werden muss, um ein oder mehrere Körperteile zu bewegen, unabhängig davon, ob externe Arbeit verrichtet wird. Denken Sie an die Beinbewegungen beim Radfahren und stellen Sie sich nun vor, dass Sie diese auf einem stationären Rad ohne Pedale nachahmen. Die externe mechanische Arbeit ist dabei gleich Null. Sie müssen aber sehr wohl (interne) mechanische Arbeit verrichten, um Ihre Beine überhaupt bewegen zu können.

1.11 Was haben menschliche Muskeln mit Pferden zu tun?

Das Tempo, mit dem mechanische Arbeit verrichtet wird, nennt man Leistung. Auch die Leistung ist ein Konstrukt aus der klassischen Mechanik. Historisch lässt sich der Gebrauch dieser mechanischen Größe auf den schottischen Erfinder James Watt (1736–1819) zurückführen. Basierend auf dem Design von Thomas Newcomen (1663–1729) entwickelte Watt die Dampfmaschine weiter, indem er deren Wirkungsgrad verbesserte. Zu der Zeit (Beginn der industriellen Revolution) wurden die Industrieprozesse von Pferden angetrieben. Watt schlug daher vor, die Effektivität von Dampfmaschinen relativ zu derjenigen von Pferden zu quantifizieren. Daher stammt der von Watt geprägte Begriff der *horsepower* (Pferdeleistung, auch bekannt als Pferdestärke). Die SI-Einheit der Leistung ist das Watt (W). Ein Watt entspricht einem Joule pro Sekunde (J s^{-1}). Und was ist Energie? Energie manifestiert sich in unterschiedlichen Formen, zum Beispiel in Wärme, Licht, Elektrizität, chemischen Reaktionen, Schall und eben Bewegung. Im Fall der Bewegung spricht man von kinetischer Energie. Energieformen können ineinander umgewandelt werden. So wird beispielsweise die aufgenommene Nahrung verdaut, wobei unter anderem auch komplexes unlösliches Material in einfache lösliche Stoffe konvertiert wird. Diese löslichen Stoffe können dann im Körper transportiert und von Körperzellen aufgenommen werden.

Umgekehrt können auch Stoffwechselzwischenprodukte (Metaboliten) aus den Zellen vom Blut transportiert und von anderen Zellen aufgenommen oder über die Atmung oder den Urin ausgeschieden werden. Wenn ein Enzym (Molekül, meistens ein Protein, welches katalytische Wirkung hat) mit einem Stoff wechselwirkt, so nennt man den Stoff „Substrat“. Bei der Wechselwirkung zwischen Substrat und Enzym kann Energie freigesetzt werden, oftmals wird aber Energie investiert. Die Energiewährung in unseren Zellen ist das Adenosintriphosphat (ATP). Beim Training liefert das ATP den Muskelfasern die chemische Energie, um Kraft zu produzieren, – und wenn dabei Bewegung entsteht, um chemische in kinetische Energie umzuwandeln. Eine Energieänderung bedeutet, dass externe und/oder interne Arbeit geleistet wurde. Bei einer Umwandlung von chemischer in mechanische Energie wird auch Wärme freigesetzt.

Training geht daher mit einer Wärmeproduktion (Thermogenese) einher. Ist die Energiefreisetzung aerob, so erfordert die Umsetzung der Substrate die Zufuhr von Sauerstoff. Bei anaeroben Reaktionen erfolgt die Energiefreisetzung ohne Sauerstoffverbrauch, auch wenn die Sauerstoffversorgung gut ist. Insbesondere im Ausdauersport ist es eine große Herausforderung, die externe Leistung oder den Speed so anzupassen, dass die Energieverfügbarkeit (das Angebot) an den Energiebedarf (die Nachfrage) angepasst ist. Konventionell sagt man, dass Energie die Kapazität darstellt, um mechanische Arbeit zu leisten. Im Kontext von Training kann diese Definition jedoch irreführend sein. Wie wir vorher gesehen haben, kommt die Konversion von chemischer bzw. metabolischer Energie nicht zwingend als externe mechanische Arbeit zum Ausdruck (wie das Beispiel der isometrischen Kraftproduktion zeigt), sondern resultiert in anderen Formen des Energieaustauschs (Wärmeproduktion). Im Kontext von Training ist es daher angebrachter, wenn wir Energie als das verstehen, was „ausgegeben“ werden muss, um zu trainieren.

1.12 Kraft schmeckt immer nach Newton

Nun, Muskeln sind keine Dampfmaschinen. Trotzdem kann das Konzept der externen (die interne wird oft ignoriert) mechanischen Arbeit und der Leistung mit gewissen Einschränkungen auf zyklische Aktivitäten im Steady State, zum Beispiel Radfahren, angewendet werden. Leider wird der Begriff der mechanischen Leistung im Training bzw. Sport aber auch oft missbräuchlich verwendet. Wie vorhin beschrieben, taugt das Konzept der externen mechanischen Arbeit überhaupt nicht dazu, den Trainingsreiz während eines isometrischen Muskeleinsatzes zu beschreiben, geschweige denn zu quantifizieren. Ähnlich verhält es sich bei „explosiven“ Sportarten wie dem Sprint, Kugel-